第39卷 第6期
2022年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 6
Nov. 2022

全生育期咸水滴灌对土壤盐分累积和棉花生长的影响

郭晓雯， 刘佳炜， 郑志玉， 闵 伟
（石河子大学农学院 绿洲生态农业兵团重点实验室，新疆 石河子 832003）

摘 要：通过研究不同灌溉水盐度和施氮量对土壤可溶性盐离子、土壤元素、酶活性、棉花生长和产量的影响，分析三者之间的关系。试验设置3种灌溉水盐度，即：0.35 dS·m^{-1}（淡水，FW）、4.61 dS·m^{-1}（微咸水，BW）和8.04 dS·m^{-1}（咸水，SW）；施氮量分别为0 kg·hm^{-2}（N0）和360 kg·hm^{-2}（N360）。结果表明：(1) 与淡水灌溉相比，微咸水和咸水灌溉显著降低棉花生物量和籽棉产量；与不施氮处理相比，施氮处理显著增加棉花生物量和籽棉产量。(2) 随灌溉水盐度增加，Na^+、Ca^{2+}、Cl^-和Ca含量显著增加，SO_4^{2-}、HCO_3^-、Mg^{2+}、Na、Ni、Co、Cr、K、Fe、Se和Cu含量显著降低；在施氮条件下，Na^+、Ca^{2+}、Cl^-和SO_4^{2-}含量显著增加，HCO_3^-、Mg^{2+}、K^+、P、K、Ca、Fe、Se、Zn、Al和Mg含量显著降低。(3) 随灌溉水盐度增加，蔗糖酶、过氧化氢酶、脱氢酶、多酚氧化酶、羟胺还原酶、碱性磷酸酶和芳基硫酸酯酶活性显著降低，硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性显著增加；施氮显著增加土壤酶活性。综合分析，咸水灌溉降低了土壤蔗糖酶、过氧化氢酶、脱氢酶、多酚氧化酶、羟胺还原酶、碱性磷酸酶和芳基硫酸酯酶活性，使得籽棉产量降低，咸水中的可溶性盐分离子Cl^-、SO_4^{2-}、Na^+和Ca^{2+}是酶活性变化的主要驱动因子。

关键词：水盐度；施氮量；土壤离子；土壤酶活性；籽棉产量

干旱区淡水资源匮乏，但咸水资源较为丰富，因此，咸水灌溉可有效改善干旱区农业发展受限于淡水缺乏的状况[1]。但咸水矿化度高，连年灌溉会使土壤盐渍化程度加剧，土体结构恶化，改变土壤理化性质，导致土壤盐渍化[2]。咸水灌溉向土壤输入盐分离子，改变土壤离子含量和种类，引起土壤矿质元素缺乏或过量，造成作物养分吸收不平衡[3]。离子间的拮抗作用和协同作用也会对土壤产生影响，既可促进良好土体结构形成，增加土壤肥力，也可危害土壤，加剧土壤恶化程度[4]。其中，Na^+是造成土壤盐渍化的主要离子，可诱导作物根系中的K^+外流，产生毒害作用[5-6]；而Ca^{2+}可以降低Na^+毒害作用，当Ca^{2+}、K^+和Mg^{2+}共存时，会形成拮抗关系，影响土壤元素的吸收[4,7]。近年来，有关土壤离子的研究集中在重金属离子对土壤的污染和盐分对土壤可溶性盐分离子的影响，但有关盐分与土壤元素间的关系的研究还较少，有待进一步探究[8-9]。盐分不仅影响土壤理化性质、离子含量和微生物活性，还能改变土壤酶活性和种类。

土壤酶活性是表征土壤养分状况的指标，对碳、氮、磷和硫等元素循环流动有重要作用，而盐分是影响其活性的主要因素，通过改变土壤理化性质和离子含量，影响土壤养分有效性和微生物活性，最终引起土壤酶种类和活性变化[10-11]。盐胁迫造成的离子毒害及渗透胁迫，会减少土壤微生物数量，进而降低微生物分泌的酶量[12]。相关研究表明，土壤盐分含量增加，可抑制脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性，但在低浓度盐离子条件下，盐离子可活化土壤微生物，释放出大量胞外酶，因而土壤脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性出现先增后减的趋势[13]。土壤酶相关研究集中在不同施肥水平、外源添加物、盐分和重金属离子对其活性的

收稿日期：2022-04-11； **修订日期：**2022-07-26
基金项目：国家自然科学基金项目（32160742）；兵团中青年科技创新领军人才项目（2020CB020）；石河子大学大学生创新训练项目（SRP2022015）
作者简介：郭晓雯（1998-），女，硕士研究生，主要研究方向为土壤肥力与调控. E-mail: guoxiaowen1031@163.com
通讯作者：闵伟. E-mail: minwei555@126.com

影响，涉及酶种类较少，土壤离子与酶活性间联系的研究还不够完善，需深入研究[14-16]。盐分可通过改变土壤微生物数量和酶活性，引起耕层土壤变化，限制作物生长发育，最终降低籽棉产量[17]。

本研究以干旱区为研究背景，设置不同灌溉水盐度和施氮水平，通过测定土壤可溶性盐分离子含量、土壤元素含量、C、N、P和S转化相关酶活性和籽棉产量，探究灌溉水盐度和氮肥对土壤可溶性盐分离子、土壤元素和酶活性的影响，揭示土壤离子、酶活性及产量三者间的内在联系，以期为干旱区合理利用咸水资源、增加棉花产量和维持土壤养分平衡提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

本研究在石河子大学农学院试验站（44°33′N，85°98′E）进行，该地区水资源匮乏，属于典型的干旱荒漠气候，年均蒸发量为1000~1500 mm，年均降水量为180~270 mm。供试作物为棉花，品种为新陆早52号。试验小区土壤类型为灰漠土，土壤基础理化性质为：土壤盐分（$EC_{1:5}$）0.13 $dS \cdot m^{-1}$，容重1.27 $g \cdot cm^{-3}$，土壤$pH_{1:2.5}$ 7.9，土壤全氮1.1 $g \cdot kg^{-1}$，土壤碱解氮52.38 $mg \cdot kg^{-1}$，土壤有机质16.8 $g \cdot kg^{-1}$，土壤速效钾253 $mg \cdot kg^{-1}$，土壤速效磷25.9 $mg \cdot kg^{-1}$。

1.2 试验设计

本研究已连续开展12 a微咸水和咸水滴灌田间试验（2009—2020年），试验设置3种灌溉水盐度，为0.35 $dS \cdot m^{-1}$（淡水，FW）、4.61 $dS \cdot m^{-1}$（微咸水，BW）和8.04 $dS \cdot m^{-1}$（咸水，SW）。施氮量分别为0 $kg \cdot hm^{-2}$（N0）和360 $kg \cdot hm^{-2}$（N360）。本试验采取完全随机区组设计，共计6个处理，每个处理重复3次，共18个试验小区，每个试验小区25 m^2。

棉花种植采用干播湿出法，于每年4月中旬播种，9月下旬收获。采用覆膜栽培技术，一膜3管6行，行距为（66+10）cm，密度为2.22×10^5株$\cdot hm^{-2}$。棉花生育期内灌溉定额为450 mm，从6月中旬至8月下旬，共计灌水9次，灌水周期为7~10 d，灌水前土壤不采取洗盐措施。氮肥（尿素，N≥46.4%）在棉花生育期内随水滴施，分5次全部做追肥，磷、钾肥全部用做基肥，磷（P_2O_5）施用量为105 $kg \cdot hm^{-2}$，钾（K_2O）施用量为60 $kg \cdot hm^{-2}$，其他田间管理措施参照当地大田生产。

微咸水和咸水是由NaCl和$CaCl_2$按1∶1比例配制而成，每次灌溉水盐度均保持一致。3种灌溉水质的化学性质如表1所示。

1.3 样品采集与处理

2021年在棉花花铃期用管型土钻采集耕层土样（0~30 cm），取样方法为对角线法，将采集的土样混合均匀并去除杂物，分为三部分，一部分鲜土过2 mm筛，保存在4 ℃的冰箱中，用于酶活性测定，一部分风干研磨后过1 mm筛，用于土壤可溶性盐分离子含量测定，另一部分风干研磨后过0.149 mm的尼龙筛，用于土壤全量元素含量测定，棉花籽棉产量在吐絮期采用样方法和实收记产测定。

1.4 土壤离子含量测定

土壤可溶性盐分离子测定方法参照土壤农业化学分析方法[18]：Ca^{2+}和Mg^{2+}含量测定采用EDTA滴定法，K^+和Na^+含量采用火焰光度法测定，HCO_3^-含量采用双指示剂-中和滴定法测定，Cl^-含量采用硝酸银滴定法，SO_4^{2-}含量采用EDTA间接络合滴定法测定；大量营养元素P和K，中量营养元素Ca和Mg，微量营养元素Fe、Cu、Zn、Ni、Mn和Mo，重金属元素Cr和Cd，土壤有益元素Na、Al、Se和Co含量采用ICP-MS测定。

1.5 土壤酶活性测定

采用关松荫[19]提供的方法测定土壤酶活性。蔗糖酶（SC）活性采用3，5-二硝基水杨酸比色法测定，脱氢酶（DHA）活性采用TTC分光光度法测定，

表1 3种灌溉水质化学性质

Tab. 1 Chemical properties of three irrigation water quality

处理	离子浓度/($g \cdot L^{-1}$)						
	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}
FW	0.013	0.005	0.049	0.014	0.060	0.087	0.035
BW	0.013	0.587	0.550	0.014	0.065	1.866	0.040
SW	0.013	1.301	1.165	0.014	0.070	3.534	0.040

羟胺还原酶(HR)活性采用硫酸铁铵-邻菲罗啉法测定,脲酶(UE)活性采用靛酚蓝比色法测定,硝酸还原酶(NR)活性采用磺胺比色法测定,多酚氧化酶(PPO)活性采用邻苯三酚比色法测定,碱性磷酸酶(ALP)活性采用磷酸苯二钠比色法测定,亚硝酸还原酶(NiR)活性采用α-萘胺-对氨基苯磺酸比色法测定,过氧化氢酶(CAT)活性采用高锰酸钾滴定法测定,芳基硫酸酯酶(ASF)活性采用对硝基苯硫酸盐法测定。

1.6 数据分析

采用SPSS统计软件包(version SPSS.26.0)进行方差分析和相关性分析,显著水平为0.05,用Duncan法对处理间进行多重比较($P<0.05$),采用Tukey检验确定组间有显著性差异($P<0.05$)。采用Excel 2016进行试验数据的计算、统计分析和制图。RDA分析(redundancy analysis)采用R语言vegan包进行分析和作图。

2 结果与分析

2.1 灌溉水盐度和施氮量对土壤可溶性盐分离子的影响

灌溉水盐度、施氮量及二者交互作用对土壤Na^+、Ca^{2+}、Cl^-和HCO_3^-含量有显著影响(图1)。与FW处理相比,BW和SW处理显著增加土壤Na^+、Ca^{2+}和Cl^-含量,BW处理分别增加了1048.15%、80.30%和772.00%,SW处理分别增加了1362.96%、166.67%和1268.00%;但显著降低了土壤HCO_3^-含量,分别降低了25.40%和40.48%。与N0处理相比,N360处理显著增加了Na^+、Ca^{2+}和Cl^-含量,分别增加了7.95%、22.84%和18.28%;但显著降低了HCO_3^-含量,降低了22.29%。交互作用的影响为:FW处理下,施氮显著降低了HCO_3^-含量,但对Na^+、Ca^{2+}和Cl^-含量无显著影响。BW和SW处理下,施氮显著增加了Ca^{2+}和Cl^-含量,BW处理分别增加了24.53%和29.47%,SW处理分别增加了31.58%和11.11%;但对HCO_3^-含量无显著影响。BW处理下,施氮显著增加了Na^+含量;但在SW处理下,施氮对Na^+含量无显著影响。

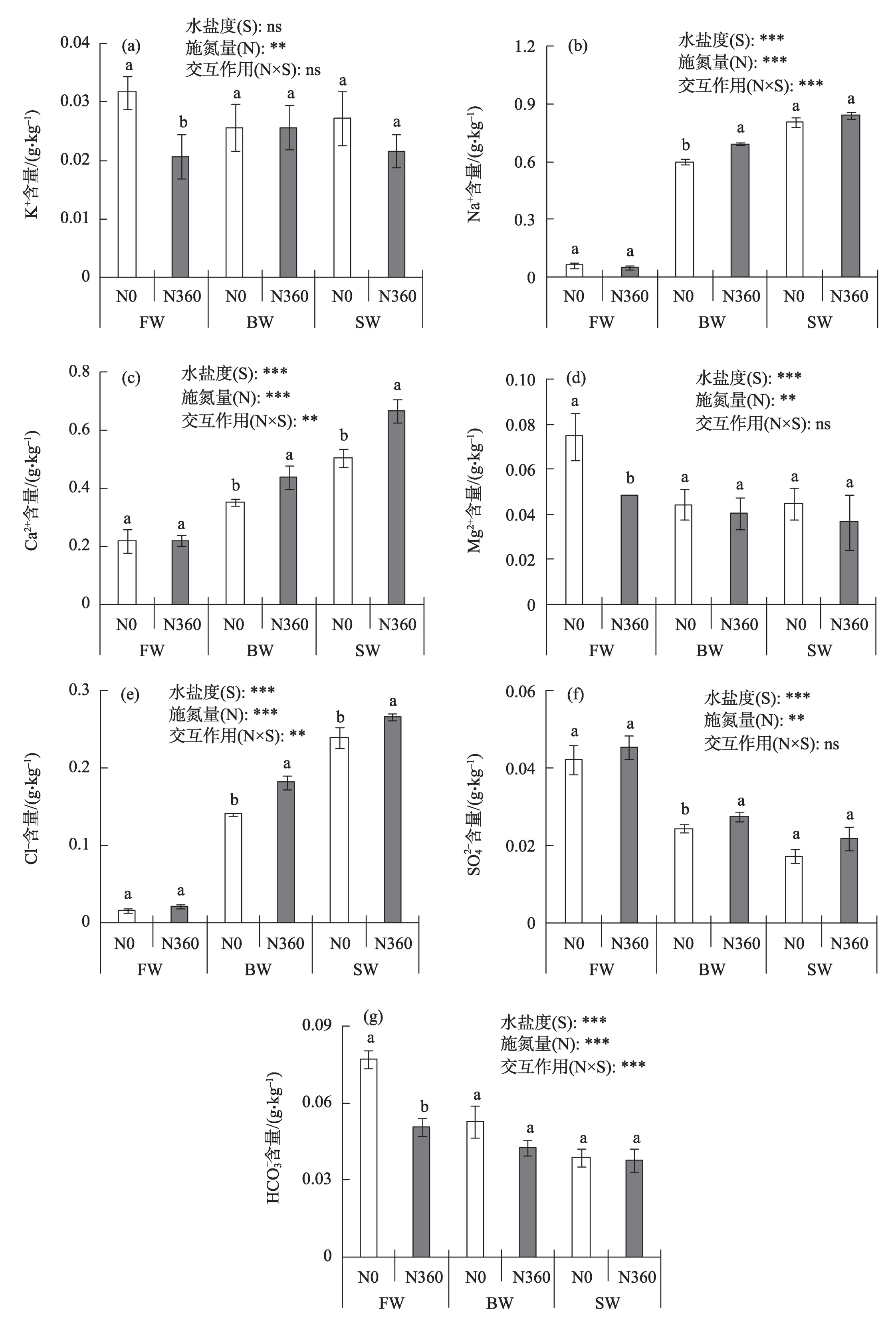
灌溉水盐度和施氮量显著影响土壤SO_4^{2-}和Mg^{2+}含量,施氮量显著影响K^+含量(图1)。与FW处理相比,BW和SW处理显著降低了SO_4^{2-}和Mg^{2+}含量,BW处理分别降低了40.88%和31.10%,SW处理分别降低了55.47%和30.88%。与N0处理相比,N360处理显著增加了SO_4^{2-}含量,增加了12.98%;但显著降低了Mg^{2+}和K^+含量,分别降低了20.70%和19.69%。此外,CO_3^{2-}含量未检出。

2.2 灌溉水盐度和施氮量对土壤元素的影响

灌溉水盐度、施氮量及二者交互作用对土壤P、K、Fe和Se含量有显著影响(表2)。与FW处理相比,BW处理显著降低了K、Fe和Se含量,分别降低了0.13%、0.38%和7.73%,但显著增加了P含量,增加10.90%;SW处理显著降低了P、K、Fe和Se含量,分别降低了0.13%、6.25%、6.61%和15.37%。与N0处理相比,N360处理显著降低了P、K、Fe和Se含量,分别降低了9.50%、3.27%、3.29%和6.36%。交互作用的影响为:FW处理下,施氮对P、K、Fe和Se含量无显著影响;但在BW和SW处理下,施氮显著降低了P含量,分别降低了17.18%和3.32%。此外,BW处理下,施氮显著降低了K、Fe和Se含量。SW处理下,施氮显著增加了Fe含量,但对K和Se含量无显著影响。

灌溉水盐度和交互作用显著影响Na、Mn、Ni、Co和Cr含量(表2)。与FW处理相比,BW处理显著降低了Na、Ni、Co和Cr含量,分别降低了3.62%、7.14%、1.60%和9.65%,但显著增加了Mn含量,增加了1.17%;SW处理显著降低了Na、Mn、Ni、Co和Cr含量,分别降低了9.12%、7.03%、10.60%、7.87%和12.80%。交互作用的影响为:FW处理下,施氮对Na、Mn、Ni、Co和Cr含量无显著影响;BW处理下,施氮显著降低了Na、Mn、Co和Cr含量,但对Ni含量无显著影响;SW处理下,施氮显著增加了Mn、Ni和Cr含量,但对Na和Co含量无显著影响。

灌溉水盐度和施氮量显著影响Ca和Mg含量,灌溉水盐度显著影响Cu含量,施氮量显著影响Zn和Al含量,灌溉水盐度和施氮量的交互作用显著影响Mo含量(表2)。与FW处理相比,BW处理显著增加了Ca和Mg含量,分别增加了1.47%和6.86%;SW处理显著增加了Ca含量,增加了9.67%,但显著降低Mg含量,降低了4.54%;BW和SW处理显著降低Cu含量,分别降低了0.21%和7.42%。与N0处理相比,N360处理显著降低了Ca、Mg、Zn和Al含量,分别降低了2.26%、7.80%、13.68%和3.46%。交互作用的影响为:FW处理下,施氮显著增加了Mo含量,



注:不同小写字母表示不同处理在P<0.05水平达到显著差异;***表示P<0.001显著性水平;**表示P<0.01显著性水平;*表示P<0.05显著性水平;ns表示P≥0.05显著性水平。下同。

图1 不同灌溉水盐度和施氮量对土壤可溶性盐分离子的影响

Fig. 1 Effects of different irrigation water salinity and nitrogen application rates on soil eight ions

表2 不同灌溉水盐度和施氮量对土壤元素的影响

Tab. 2 Effects of different irrigation water salinity and nitrogen application rates on soil elements

水盐度	施氮量	Na /(g·kg⁻¹)	P /(g·kg⁻¹)	K /(g·kg⁻¹)	Ca /(g·kg⁻¹)	Mg /(g·kg⁻¹)	Fe /(g·kg⁻¹)	Cu /(mg·kg⁻¹)	Zn /(mg·kg⁻¹)
FW	N0	19.47a	1.26a	22.89a	26.80a	18.07a	33.26a	30.10a	157.52a
	N360	20.06a	1.18a	21.88a	26.58a	17.92a	31.67a	29.50a	135.21b
BW	N0	20.23a	1.48a	23.05a	27.25a	20.25a	33.77a	30.68a	154.47a
	N360	17.87b	1.23b	21.66b	26.91a	18.21b	30.90b	28.80b	128.01b
SW	N0	17.81a	1.24a	20.87a	29.94a	18.29a	29.68b	27.06a	146.72a
	N360	18.12a	1.20b	21.09a	28.60b	16.06b	30.95a	28.12a	132.76a
两因素方差分析									
水盐度(S)		***	***	***	***	*	***	**	ns
施氮量(N)		ns	***	**	*	**	**	ns	***
交互作用(N×S)		***	***	*	ns	ns	***	ns	ns

水盐度	施氮量	Mn /(g·kg⁻¹)	Mo /(mg·kg⁻¹)	Ni /(mg·kg⁻¹)	Se /(mg·kg⁻¹)	Co /(mg·kg⁻¹)	Al /(g·kg⁻¹)	Cr /(mg·kg⁻¹)	Cd /(mg·kg⁻¹)
FW	N0	0.9101a	1.19b	33.79a	0.1354a	14.20a	38.51a	64.58a	0.2031a
	N360	0.8954a	1.56a	33.81a	0.1284a	14.00a	37.99a	64.41a	0.2005a
BW	N0	0.9268a	1.45a	32.27a	0.1334a	14.62a	39.44a	60.38a	0.1999a
	N360	0.8997b	1.18a	30.51a	0.1101b	13.13b	38.48a	56.16b	0.1967a
SW	N0	0.8281b	1.41a	29.37b	0.1085a	12.69a	39.01a	52.97b	0.1871b
	N360	0.8505a	1.32a	31.07a	0.1148a	13.30a	36.44b	59.52a	0.1976a
两因素方差分析									
水盐度(S)		***	ns	***	***	**	ns	***	ns
施氮量(N)		ns	ns	ns	*	ns	*	ns	ns
交互作用(N×S)		**	***	**	**	**	ns	**	ns

注:不同小写字母表示不同处理在$P<0.05$水平达到显著差异;***表示$P<0.001$显著性水平;**表示$P<0.01$显著性水平;*表示$P<0.05$显著性水平;ns表示$P\geq0.05$显著性水平。

但在BW和SW处理下,施氮对Mo含量无显著影响。此外,灌溉水盐度、施氮量及二者交互作用对Cd含量无显著影响。

2.3 灌溉水盐度和施氮量对酶活性的影响

灌溉水盐度、施氮量及二者交互作用显著影响SC、PPO、CAT和DHA活性(图2)。与FW处理相比,BW和SW处理显著降低了SC、PPO、CAT和DHA活性,BW处理分别降低了26.55%、20.52%、0.67%和2.32%,SW处理分别降低了50.47%、41.10%、3.52%和37.91%。与N0处理相比,N360处理显著增加了SC、PPO、CAT和DHA活性,分别增加了44.21%、26.5%、3.54%和87.12%。交互作用的影响为:在不同灌溉水的处理下,施氮显著增加了DHA和PPO活性,但增加幅度差异较大,FW处理分别增加了150.08%和47.17%,BW处理分别增加了51.05%和15.85%,SW处理分别增加了69.96%和10.63%;此外,FW和SW处理下,施氮显著增加了SC和CAT活性,但在BW处理下,施氮对SC和CAT活性无显著影响。

灌溉水盐度、施氮量及二者交互作用显著影响UE、NiR、NR和HR活性(图3)。与FW处理相比,BW和SW处理显著增加了NiR和NR活性,BW处理分别增加了91.93%和13.59%,SW处理分别增加了106.68%和30.49%,但显著降低了HR活性,分别降低了24.36%和2.90%;BW处理显著降低了UE活性,降低了6.98%,但SW处理显著增加了UE活性,增加了7.57%。与N0处理相比,N360处理显著增加了UE、NiR、NR和HR活性,分别增加了40.06%、35.25%、32.49%和26.88%。交互作用的影响为:在不同灌溉水的处理下,施氮显著增加了UE和NiR活性,但增加幅度差异较大,FW处理分别增加了18.62%和31.29%,BW处理分别增加了28.76%和39.58%,SW处理分别增加了77.17%和33.26%。FW和BW处理下,施氮显著增加了NR活性,但是在

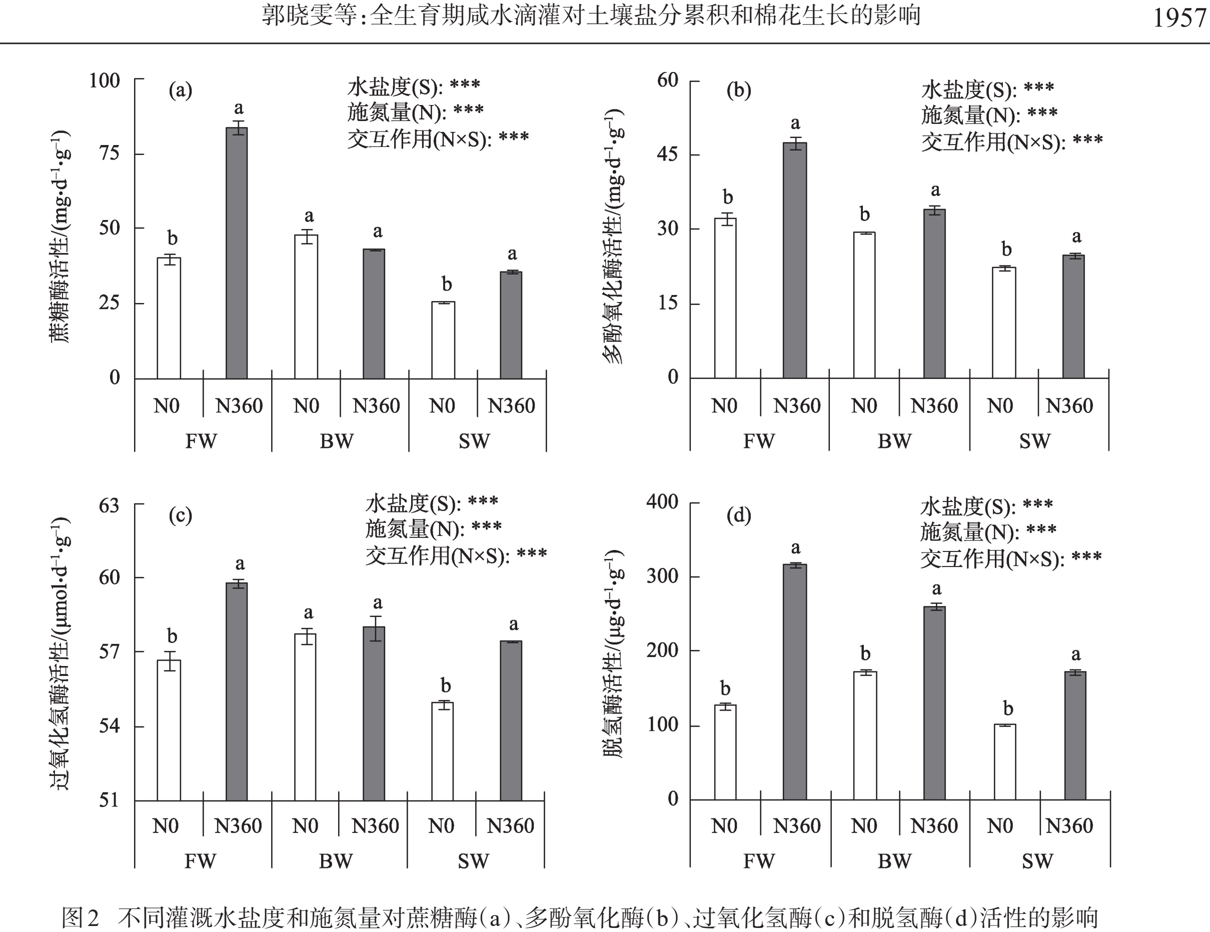


图2 不同灌溉水盐度和施氮量对蔗糖酶(a)、多酚氧化酶(b)、过氧化氢酶(c)和脱氢酶(d)活性的影响

Fig. 2 Effects of different irrigation water salinity and nitrogen application rates on the activities of SC (a), PPO (b), CAT (c) and DHA (d)

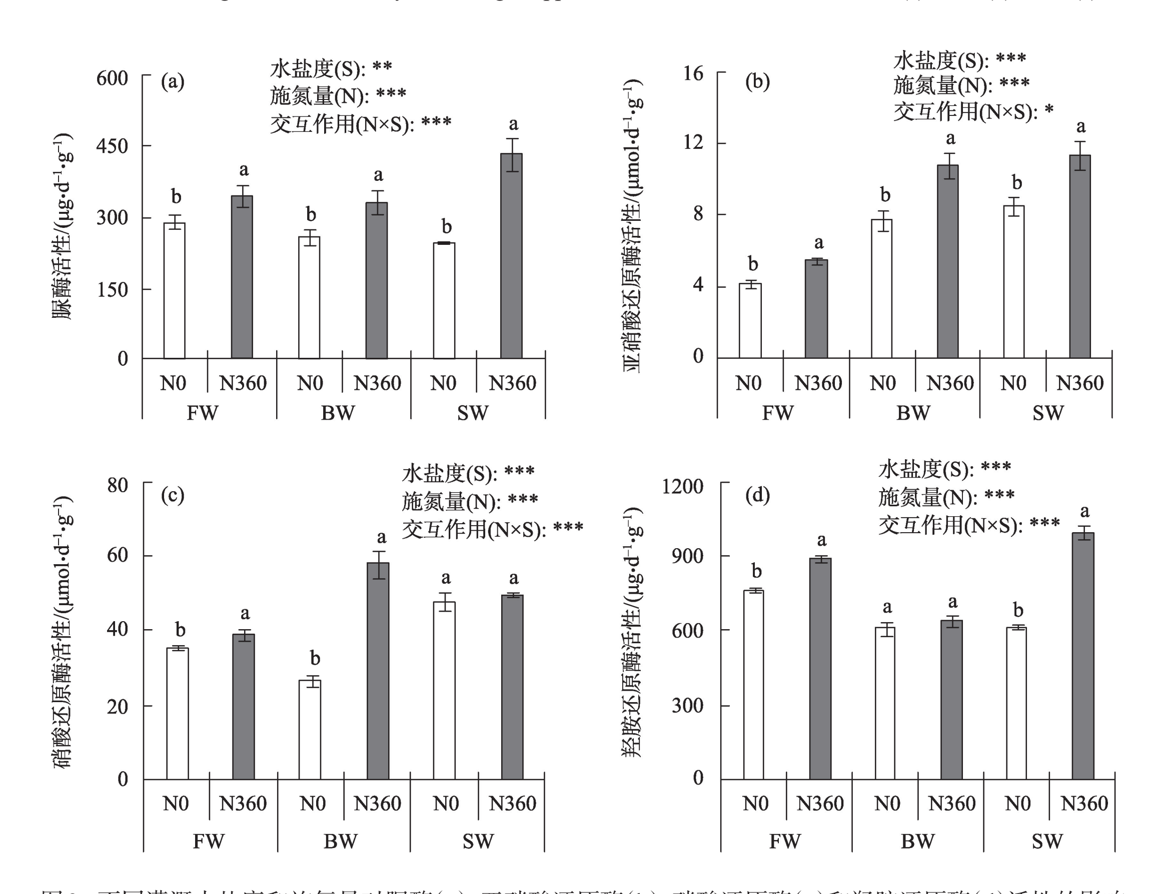


图3 不同灌溉水盐度和施氮量对脲酶(a)、亚硝酸还原酶(b)、硝酸还原酶(c)和羟胺还原酶(d)活性的影响

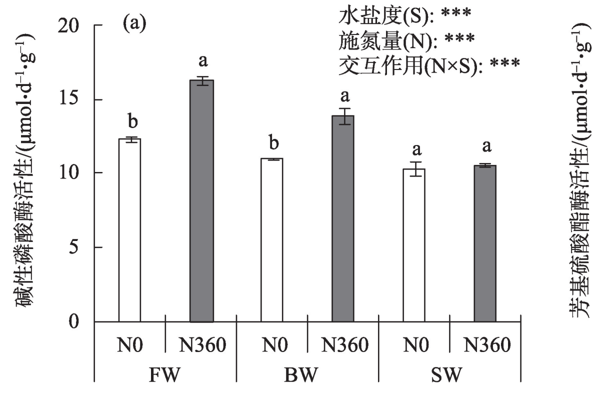
Fig. 3 Effects of different irrigation water salinity and nitrogen application rates on the activities of UE (a), NiR (b), NR (c) and HR (d)

SW处理下无显著差异，FW和SW处理下，施氮显著增加了HR活性，但是在SW处理下无显著差异。

灌溉水盐度、施氮量及二者交互作用显著影响ALP和ASF活性（图4）。与FW处理相比，BW和SW处理显著降低了ALP和ASF活性，BW处理分别降低了13.09%和36.94%，SW处理分别降低了27.03%和35.73%。与N0处理相比，N360处理显著增加了ALP和ASF活性，分别增加了20.84%和19.88%。但是在SW处理下无显著差异，FW和BW处理下，施氮显著增加了ALP活性，但在SW处理下，施氮对ALP活性无显著影响。BW和SW处理下，施氮显著增加了ASF活性，但在FW处理下，施氮对ASF活性无显著影响。

2.4 灌溉水盐度和施氮量对棉花生长和籽棉产量的影响

灌溉水盐度、施氮量及其二者交互作用显著影



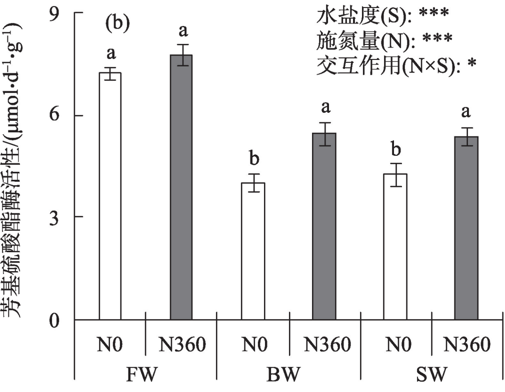


图4 不同灌溉水盐度和施氮量对碱性磷酸酶（a）和芳基硫酸酯酶（b）活性的影响

Fig. 4 Effects of different irrigation water salinity and nitrogen application rates on the activities of ALP (a) and ASF (b)

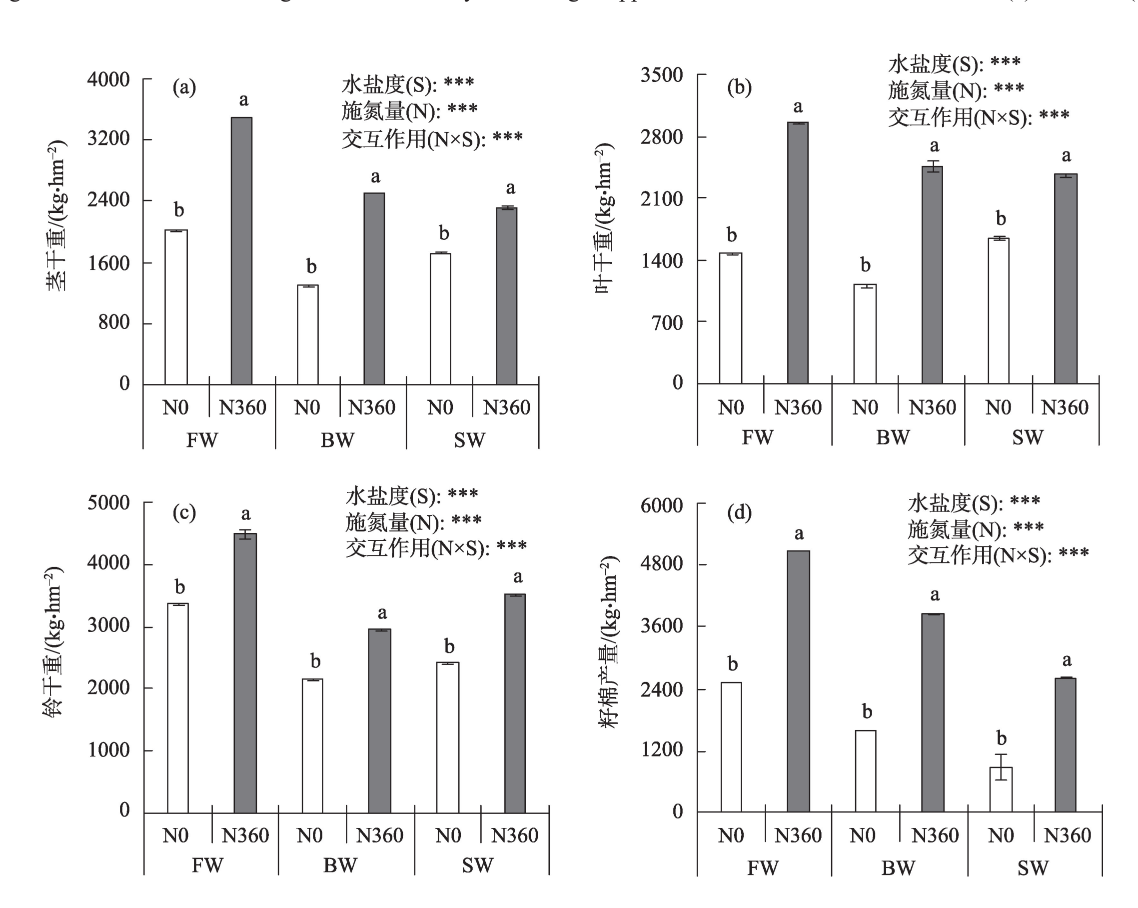


图5 不同灌溉水盐度和施氮量对棉花生长和产量的影响

Fig. 5 Effects of different irrigation water salinity and nitrogen application rate on cotton growth and yield

响棉花生长和籽棉产量(图5)。与FW处理相比,BW和SW处理显著降低了棉花茎干重、叶干重、铃干重和籽棉产量,BW分别降低了30.96%、19.01%、34.94%和28.15%,SW分别降低了26.79%、9.21%、24.18%和54.03%。与N0处理相比,N360显著增加棉花茎干重、叶干重、铃干重和籽棉产量,分别增加了65.21%、82.86%、37.58%和131.78%。交互作用的影响为:随着灌溉水盐度的增加,氮肥的增产效应不同,FW处理棉花茎干重、叶干重、铃干重和籽棉产量分别增加了72.63%、99.40%、32.88%和102.57%,BW处理棉花茎干重、叶干重、铃干重和籽棉产量分别增加了93.94%、120.20%、36.96%和140.02%,SW处理棉花茎干重、叶干重、铃干重和籽棉产量分别增加了34.83%、42.83%、44.64%和200.76%。

2.5 土壤可溶性盐分离子与土壤酶活性的相关性

对土壤可溶性盐分离子和酶活性进行RDA分析,第一轴的解释变异量为59.99%,第二轴的解释变异量为13.55%,两轴共解释总变异的73.54%(图6)。土壤酶活性与Cl^-(解释度17.15%,P=0.005)、SO_4^{2-}(解释度2.87%,P=0.001)、K^+(解释度2.69%,P=0.034)和Ca^{2+}(解释度19.43%,P=0.001)存在显著相关关系,与其他离子无显著相关关系。

土壤Cl^-和Na^+与Ca^{2+}呈锐角,属于正相关关系,与土壤HCO_3^-、K^+、SO_4^{2-}和Mg^{2+}呈钝角,属于负相关关系。Cl^-与SC、ALP、ASF和PPO活性呈极显著负相关关系,与CAT活性呈显著负相关关系,与NR活性呈显著正相关关系,与NiR活性呈极显著正相关关系;HCO_3^-与NR呈显著负相关关系,与NiR活性

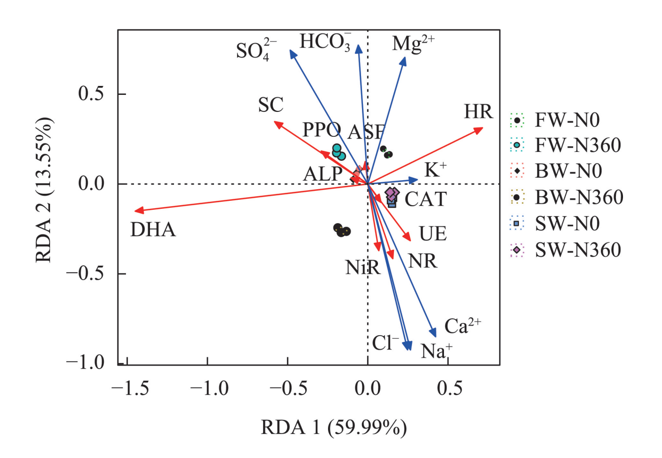


图6 土壤可溶性盐分离子与酶活性的相关性

Fig. 6 Correlation between soil soluble salt ions and enzyme activities

呈极显著负相关关系,与ASF活性呈显著正相关关系;K^+与UE、CAT和DHA活性呈显著的负相关关系;Na^+和Ca^{2+}与SC、ALP、ASF和CAT活性呈极显著的负相关关系,与NR活性呈显著正相关关系,与NiR活性呈极显著正相关关系;SO_4^{2-}与NiR活性呈极显著负相关关系,与DHA活性呈显著正相关关系,与SC、ALP、ASF、PPO和CAT活性呈极显著正相关关系;Mg^{2+}与NiR活性呈极显著负相关关系,与ASF活性呈显著正相关关系。

2.6 土壤C、N、P和S转化有关酶活性与籽棉产量的相关性分析

通过酶活性和棉花籽棉产量进行相关性分析发现,蔗糖酶活性与棉花籽棉产量呈极显著正相关关系(P<0.001)(图7c);过氧化氢酶活性与棉花籽棉产量呈极显著正相关关系(P<0.001)(图7e);脱氢酶活性与棉花籽棉产量呈极显著正相关关系(P<0.001)(图7d);多酚氧化酶活性与棉花籽棉产量呈极显著正相关关系(P<0.001)(图7f);脲酶活性与棉花籽棉产量呈显著正相关关系(P<0.05)(图7a),羟胺还原酶活性与棉花籽棉产量呈显著正相关关系(P<0.05)(图7b);碱性磷酸酶活性与棉花籽棉产量呈极显著正相关关系(P<0.001)(图7h);芳基硫酸酯酶活性与棉花籽棉产量呈极显著正相关关系(P<0.001)(图7g)。此外,硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性与棉花籽棉产量无显著相关关系。微咸水和咸水灌溉会向土壤输入盐分离子,改变土壤原有可溶性离子和元素含量,进而影响酶活性,其中Na^+、Cl^-和SO_4^{2-}是改变土壤结构的主导因子,会恶化棉花生长环境,而土壤元素含量和酶活性的变化会造成土壤养分不平衡,最终导致棉花产量降低。氮肥的施用在增加土壤氮素养分的同时,也可改变土壤可溶性离子的含量、土壤元素含量和酶活性,进而增加棉花产量。

3 讨 论

3.1 灌溉水盐度和施氮量对土壤离子和土壤元素含量的影响

土壤离子可作为酶、激素和辅酶等生物分子的组分和活化剂,参与作物体内一系列代谢过程[20],也可参与土壤养分循环和转化过程。长期咸水灌溉和氮肥的施用会改变土壤理化性质,进而影响土

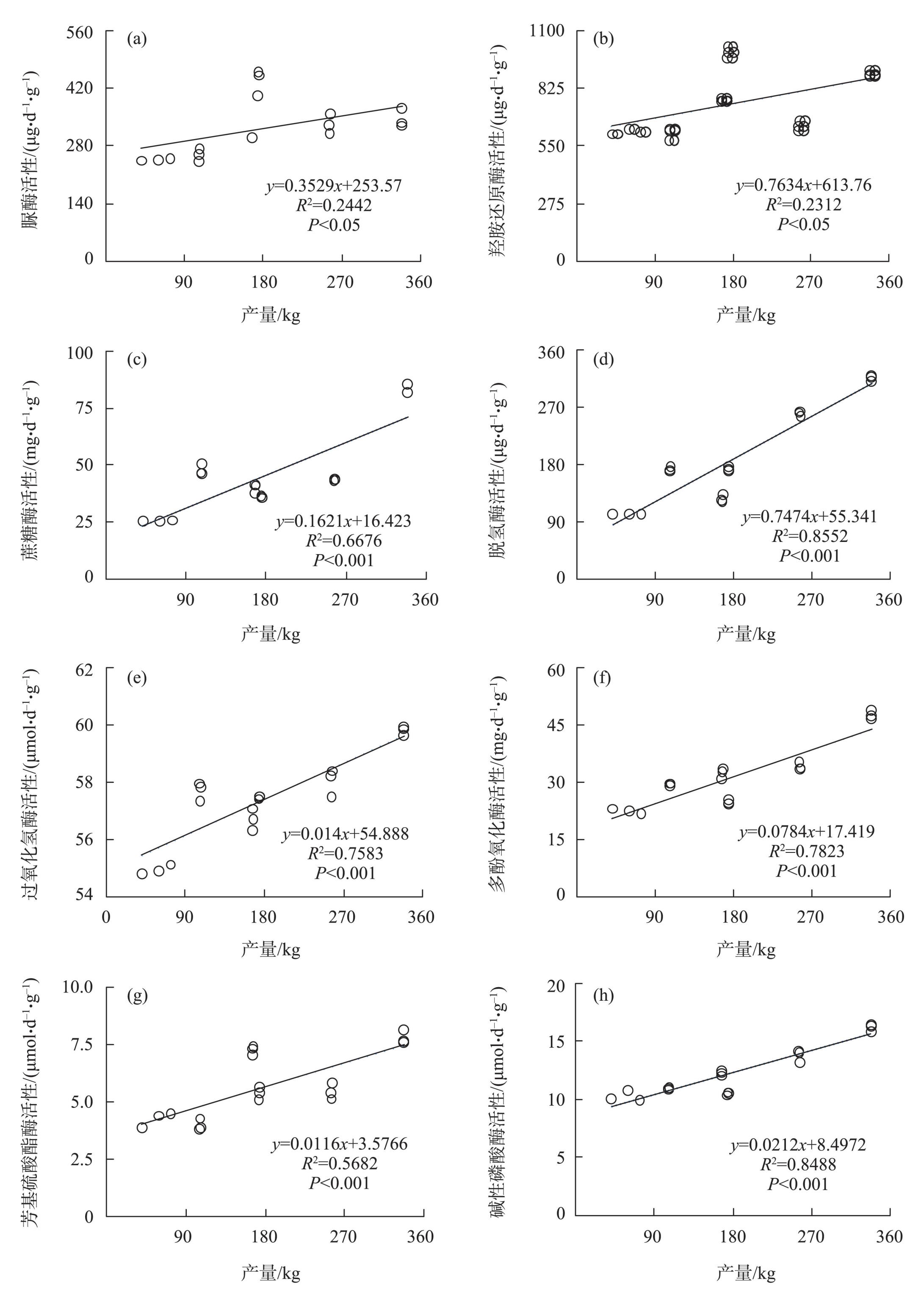


图7 土壤酶活性与产量的相关性

Fig. 7 Correlation between soil enzyme activity and yield

壤离子含量[21]。本研究表明，Na^+、Ca^{2+}和Cl^-含量随灌溉水盐度增加显著增加，SO_4^{2-}、HCO_3^-和Mg^{2+}含量随灌溉水盐度增加显著降低，是因为咸水中含大量的Na^+、Ca^{2+}和Cl^-，经灌溉进入土壤，其含量增加[22]，而SO_4^{2-}和HCO_3^-与Ca^{2+}和Mg^{2+}结合生成微溶物质，从而降低其含量[8]。当Cl^-含量超过一定浓度时，会抑制作物对NO_3^-、$H_2PO_4^-$、K^+和P的吸收，进而对土壤中NO_3^-、$H_2PO_4^-$、K^+和P含量产生影响[23]，盐分离子含量的变化还可能与土壤吸附作用有关，也可能与灌溉水的溶解再重新分配有关[24]。本研究还表

明,氮肥的施用显著增加Na^+、Ca^{2+}、Cl^-和SO_4^{2-}含量,可能是氮肥施用量与土壤盐分积累密切相关[25]。其中Na^+和Cl^-含量增加会使土壤盐分有钠质化发展的趋势,易造成单盐毒害,危害作物根系,也会与其他离子产生拮抗作用,引起营养元素失调[26]。

咸水灌溉和氮肥施用也会影响土壤元素的含量。本研究发现,土壤元素中Na、Ni、Co、Cr、K、Fe、Se和Cu含量随灌溉水盐度增加而降低;Ca含量随灌溉水盐度增加而增加,可能是盐分胁迫下,作物根系的敏感性限制对养分的吸收,从而造成元素含量改变[27]。施氮条件下,土壤元素中P、K、Fe、Se、Ca、Zn、Al和Mg含量较不施氮处理显著降低。相关研究表明,长期施用氮肥可增加土壤Fe、Mn、Zn和Cu离子含量[28],降低土壤Na、K、Mg和Ca含量,可能是氮肥施用促进作物生长,加速作物对养分的吸收利用,从而使离子含量降低[29]。

3.2 灌溉水盐度和施氮量对酶活性的影响

土壤酶是土壤微生态中活跃组分之一,其活性可反映土壤肥力状况,是评价土壤质量的重要指标[30]。盐分和施氮量是影响土壤酶活性的重要因素。本研究发现,咸水灌溉会降低蔗糖酶、过氧化氢酶、脱氢酶、多酚氧化酶、羟胺还原酶、碱性磷酸酶和芳基硫酸酯酶活性,可能是咸水中的Na^+离子使土壤板结,恶化土壤环境,抑制作物根系生长和微生物数量,从而降低酶活性[31]。本研究也发现,咸水灌溉能增加硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性,但相关研究表明,盐分对硝酸还原酶活性影响较小,但对亚硝酸还原酶活性有抑制作用,可能是土壤理化性质的改变,影响硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性[32]。但对于脲酶而言,咸水灌溉抑制其活性,微咸水灌溉促进其活性,可能是微咸水能够对脲酶形成刺激,增加其活性[33]。氮肥的施用能改善土壤质量,促进作物和微生物生长,增加产酶量和酶活性[34]。本研究还发现,施氮条件下土壤酶活性得到提高,可能是施用氮肥抑制土壤积盐,改善土壤状况,为土壤酶提供了适宜的生存环境,有利于提高其活性[35],也可能是施氮增加土壤有机质含量,刺激作物根际代谢,增加根系分泌物含量,促进作物生长,为土壤中的微生物提供氮源和碳源,改变作物根系环境和微生物群落结构,在根际形成养分库,进而提高土壤酶活性[36];也有研究发现,作物在不同生育期内土壤酶活性呈现出不同变化趋势,这与作物不同生育期内对养分的需求不同,导致土壤离子产生变化,进而影响酶活性[37]。

3.3 灌溉水盐度和施氮量对棉花生物量和籽棉产量的影响

咸水灌溉破坏土壤水盐平衡,导致盐分在土表积聚,形成次生盐渍化土壤,造成作物减产[38]。本研究表明,微咸水和咸水灌溉显著降低棉花生物量和籽棉产量,是因为盐分的增加改变了土壤结构,使得土壤板结,容重增加,排盐能力降低,盐分聚集,从而盐胁迫对作物的抑制作用更显著,降低作物生物量和产量[39]。盐分能通过抑制作物对水分的吸收,限制作物的生长发育,最终影响产量[40]。有研究表明,盐分可改变水稻穗部性状进而影响水稻产量[41],还可影响小麦根系呼吸,降低其抗氧化和养分吸收能力,造成小麦减产[42]。

氮素是作物生长所需的必需营养元素,能增加作物产量[43]。本研究表明,施氮显著增加棉花生物量和籽棉产量,原因可能是施用氮肥能够促进作物根系的生长,促进其吸收利用养分,提高养分利用率[44];也可能是因为氮肥能够增强作物光合能力,从而增加作物产量[45]。相关研究表明,在低盐及中高盐地区,氮肥对番茄生理与产量有较大促进作用[46],氮肥的施用也可增加饲草作物的产量[47],不同施氮量对产量的影响也不同,盐碱滩涂水稻产量在低氮条件下呈增加趋势,但在高氮条件下呈降低趋势[48]。

3.4 土壤酶活性与土壤离子、棉花籽棉产量间的相关性分析

土壤酶来源于微生物、腐殖质、作物根系及其分泌物,其对土壤碳、氮、磷和硫等养分循环流动具有重要作用,能够促进作物生长,进而影响作物的产量[49]。本研究发现,土壤可溶性盐离子与酶活性间密切相关,可溶性盐分离子中Cl^-、SO_4^{2-}、Na^+和Ca^{2+}对酶活性有显著影响,可能是离子在土壤中的含量、种类和价态不同,对土壤环境和作物生长影响不同,酶对土壤离子的敏感性也不同[50]。通过分析土壤酶活性与棉花产量间的关系发现除硝酸还原酶和亚硝酸还原酶外,其余酶活性与棉花籽棉产量均存在显著正相关关系。相关研究表明,土壤酶活性通过改变土壤养分含量,进而影响作物产量[51]。其中,蔗糖酶和多酚氧化酶可参与木质素降解,有机组分中芳香族化合物的转化,是腐殖化的媒介[52];脱

氢酶能够催化土壤有机物质脱氢，可反映土壤有机质厌氧分解强度；脲酶参与土壤氮素转化，可为作物提供氮素营养[53]；碱性磷酸酶利于土壤有机磷矿化，增加作物吸收磷素的能力；过氧化氢酶可抵御干旱胁迫，有利于作物在干旱环境的生长发育[48]；芳基硫酸酯酶可以影响硫代谢，将有机态硫转化为速效硫，可提高作物抵御逆境的能力[54]。

4 结 论

（1）随灌溉水盐度增加，棉花生物量和产量显著降低；随施氮量增加，棉花生物量和产量显著增加。

（2）随灌溉水盐度增加，Na^+、Ca^{2+}、Cl^-、Ca、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性显著增加；但SO_4^{2-}、HCO_3^-、Mg^{2+}、Na、Ni、Co、Cr、K、Fe、Se、Cu、蔗糖酶、过氧化氢酶、脱氢酶、多酚氧化酶、羟胺还原酶、碱性磷酸酶和芳基硫酸酯酶活性显著降低。氮肥的施用显著增加Na^+、Ca^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、蔗糖酶、过氧化氢酶、脱氢酶、多酚氧化酶、脲酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、羟胺还原酶、碱性磷酸酶和芳基硫酸酯酶活性；但显著降低Mg^{2+}、K^+、HCO_3^-、P、K、Ca、Fe、Se、Zn、Al和Mg含量。

（3）Cl^-、SO_4^{2-}、K^+和Ca^{2+}是土壤酶活性的主要驱动因子。

参考文献(References)：

[1] 李燕, 卢楠. 土地盐碱化成因及整治对策研究[J]. 河南农业, 2021(8): 61-62. [Li Yan, Lu Nan. Study on the causes and countermeasures of land salinization[J]. Agriculture of Henan, 2021(8): 61-62.]

[2] 季泉毅, 冯绍元, 霍再林, 等. 咸水灌溉对土壤盐分分布和物理性质及制种玉米生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(3): 20-25. [Ji Quanyi, Feng Shaoyuan, Huo Zailin, et al. Effects of saline water irrigation on salinity distribution, soil physical properties and the growth of seed maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(3): 20-25.]

[3] 任红, 唐琪, 韩丛聪, 等. 盐胁迫对刺槐根系离子、根际土壤酶及微生物种群的影响[J]. 山东农业科学, 2018, 50(2): 38-44. [Ren Hong, Tang Qi, Han Congcong, et al. Effects of salt stress on root ions and enzymes and microbial population in rhizosphere soil of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.)[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2018, 50(2): 38-44.]

[4] 赵杰, 肖辉, 王立艳, 等. 滨海盐碱土壤盐分离子对番茄钙吸收的影响[J]. 北方园艺, 2021(14): 1-7. [Zhao Jie, Xiao Hui, Wang Liyan, et al. Effects of salt ions on the calcium absorption of tomato in coastal saline-alkali soil[J]. Northern Horticulture, 2021(14): 1-7.]

[5] Deinlein U, Stephan A B, Horie T, et al. Plant salt-tolerance mechanisms[J]. Trends in Plant Science, 2014, 19(6): 317-379.

[6] Gupta B, Huang B. Mechanism of salinity tolerance in plants: Physiological, biochemical, and molecular characterization[J]. International Journal of Genomics, 2014, 701596.

[7] Kopittke P M. Interactions between Ca, Mg, Na and K: alleviation of toxicity in saline solutions[J]. Plant and Soil, 2012, 352(1): 353-362.

[8] 郭全恩, 王益权, 南丽丽, 等. 不同溶质及矿化度对土壤溶液盐离子的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 105-111. [Guo Quanen, Wang Yiquan, Nan Lili, et al. Effects of solute types and degree of mineralization on salt ions in soil release solution[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(11): 105-111.]

[9] 郭俊娒, 杨俊兴, 杨军, 等. 盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中Cd积累特征[J]. 环境科学, 2021, 42(3): 1177-1184. [Guo Junmei, Yang Junxing, Yang Jun, et al. Cd accumulation characteristics in different populations of hylotelephium spectabile under salt stress[J]. Environmental Science, 2021, 42(3): 1177-1184.]

[10] 李艳红, 朱海强, 方丽章, 等. 艾比湖湿地植物群落土壤酶活性特征及影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 549-559. [Li Yanhong, Zhu Haiqiang, Fang Lizhang, et al. Soil enzyme activity characteristics and impact factors under plant communities of the Ebinur lake wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 549-559.]

[11] 严焕焕, 耿贵工, 乔枫, 等. 氮、硫及氮硫交互对土壤酶活性的影响[J]. 青海大学学报, 2020, 38(2): 20-25. [Yan Huanhuan, Geng Guigong, Qiao Feng, et al. Effects of nitrogen, sulfur and nitrogen-sulfur interaction on soil enzyme activity[J]. Journal of Qinghai University, 2020, 38(2): 20-25.]

[12] 邹晓君, 列志旸, 薛立. 盐胁迫对4种园林植物土壤养分及酶活性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(3): 74-78. [Zou Xiaojun, Lie Zhiyang, Xue Li. Effects of salt stress on soil nutrient and enzyme activity of four landscape plants[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(3): 74-78.]

[13] 翟红梅, 曹彩云, 刘孟雨. 长期咸水灌溉对土壤酶活性及反应动力学的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 95-101. [Zhai Hongmei, Cao Caiyun, Liu Mengyu. Impact of irrigation with saline water on soil enzyme activity and soil enzyme kinetics[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(1): 95-101.]

[14] 马垒, 李燕, 魏建林, 等. 长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4755-4764. [Ma Lei, Li Yan, Wei Jianlin, et al. Effects of long-term straw returning on fungal community, enzyme activity and wheat yield in a Fluvo-aquic soil[J]. Environmental Science, 2022, 43(10): 4755-4764.]

[15] 王丽君, 程瑞梅, 肖文发, 等. 氮添加对三峡库区马尾松-栓皮栎混交林土壤微生物生物量和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(1): 42-50. [Wang Lijun, Cheng Ruimei, Xiao Wenfa, et al. Effects of nitrogen addition on soil microbial biomass and enzyme activities of *Pinus massoniana*-*Quercus variabilis* mixed plantations in the Three Gorges reservoir area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(1): 42-50.]

[16] 孔龙, 谭向平, 和文祥, 等. 外源Cd对中国不同类型土壤酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(24): 5150-5162. [Kong Long, Tan Xiangping, He Wenxiang, et al. Response of soil enzyme activity in different type of soils to cadmium exposure in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(24): 5150-5162.]

[17] 郭潇潇, 王雪莱, 梁海芸, 等. 盐碱胁迫对芸豆根际土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(4): 148-157. [Guo Xiaoxiao, Wang Xuelai, Liang Haiyun, et al. Effects of salinity-alkalinity stress on rhizosphere soil microbial quantity and enzyme activity of common bean[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(4): 148-157.]

[18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. [Lu Rukun. Methods for Agrochemical Analysis of Soil [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.]

[19] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274-276. [Guan Songyin. Soil Enzymes and the Research Methods [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986: 274-276.]

[20] Gupta N, Yadav K K, Kumar V, et al. Trace elements in soil-vegetables interface: translocation, bioaccumulation, toxicity and amelioration-a review[J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 2927-2942.

[21] 仙旋旋, 孔范龙, 朱梅珂, 等. 水盐梯度对滨海湿地土壤养分指标和酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 65-71. [Xian Xuanxuan, Kong Fanlong, Zhu Meike, et al. Effects of water and salt gradients on soil nutrient indices and enzyme activities in coastal wetlands[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(1): 65-71.]

[22] 朱珠, 姚宝林, 李男, 等. 微咸水灌溉条件下土壤残膜对棉花出苗率与土壤盐分影响研究[J]. 节水灌溉, 2021(3): 7-11. [Zhu Zhu, Yao Baolin, Li Nan, et al. Effects of soil film residue on seeding emergence rate and salinity of cotton under brackish water irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2021(3): 7-11.]

[23] 程明芳, 金继运, 李春花, 等. 氯离子对作物生长和土壤性质影响的研究进展[J]. 浙江农业科学, 2010(1): 12-14. [Cheng Mingfang, Jin Jiyun, Li Chunhua, et al. Research progress on the effects of chloride ion on crop growth and soil properties[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2010(1): 12-14.]

[24] 赵宇, 邵建荣. 干旱区滴灌条件下盐碱土壤盐基离子运移特征[J]. 新疆农垦科技, 2017, 40(5): 46-48. [Zhao Yu, Shao Jianrong. Characteristics of base ion transport in saline alkali soil under drip irrigation in arid area[J]. Xinjiang Farm Research of Science and Technology, 2017, 40(5): 46-48.]

[25] 张锡洲, 王永东, 余海英, 等. 不同形态氮肥对设施土壤盐分含量和元素成的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 16-20, 50. [Zhang Xizhou, Wang Yongdong, Yu Haiying, et al. Effects of different nitrogen fertilizes on salt content and ion composition in greenhouse soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5): 16-20, 50.]

[26] 郑复乐, 姚荣江, 杨劲松, 等. 改良材料对微咸水滴灌农田土壤盐分分布与元素成的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 60-71. [Zheng Fule, Yao Rongjiang, Yang Jinsong, et al. The effects of soil amendment with different materials on soil salt distribution and its ion composition under brackish- water drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 60-71.]

[27] 王渌, 郭建曜, 毕思圣, 等. 磁化咸水灌溉对葡萄生长和土壤矿质养分的影响[J]. 果树学报, 2019, 36(12): 1683-1692. [Wang Lu, Guo Jianyao, Bi Sisheng, et al. Effects of irrigation with magnetized saline water on vitis vinifera growth and soil mineral nutrients [J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(12): 1683-1692.]

[28] 杨丽娟, 李天来, 付时丰, 等. 长期施肥对菜田土壤微量元素有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006(4): 549-553. [Yang Lijuan, Li Tianlai, Fu Shifeng, et al. Effects of long-term fertilization on availability of micro-elements in vegetable soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2006(4): 549-553.]

[29] 秦书琪, 房凯, 王冠钦, 等. 高寒草原土壤交换性盐基离子对氮添加的响应: 以紫花针茅草原为例[J]. 植物生态学报, 2018, 42 (1): 95-104. [Qin Shuqi, Fang Kai, Wang Guanqin, et al. Responses of exchangeable base cations to continuously increasing nitrogen addition in alpine steppe: A case study of *Stipa purpurea* steppe[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(1): 95-104.]

[30] 于德良, 雷泽勇, 张岩松, 等. 沙地樟子松人工林土壤酶活性及其影响因子[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 621-629. [Yu Deliang, Lei Zeyong, Zhang Yansong, et al. Soil enzyme activity and its affecting factors under *Pinus sylvetris* var. *mongolica* plantation in sandy land[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 621-629.]

[31] 苏鑫, 卢嫚, 冯程程, 等. 松嫩草地土壤酶活性对土壤盐分季节动态的响应[J]. 中国草地学报, 2020, 42(1): 127-134. [Su Xin, Lu Man, Feng Chengcheng, et al. Responses of seasonal dynamic of soil enzyme activity to soil salinity in Songnen saline- alkali grassland[J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(1): 127-134.]

[32] 闵伟, 侯振安, 梁永超, 等. 土壤盐度和施氮量对灰漠土尿素N转化的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(6): 1372-1379. [Min Wei, Hou Zhenan, Liang Yongchao, et al. Effects of soil salinity level and nitrogen rate on urea- N transformation in grey desert soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(6): 1372-1379.]

[33] 孙凯宁, 王克安, 杨宁. 隔盐方式对设施盐渍化土壤主要盐离子空间分布及酶活性的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 57-61. [Sun Kaining, Wang Ke'an, Yang Ning. Effects of salt isolating methods on spatial distribution of major saline ions and en-

zyme activities in greenhouse saline soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(3): 57–61.]

[34] 王顺, 尹娟, 张海军, 等. 不同水氮处理对马铃薯土壤酶活性和产量的影响[J]. 节水灌溉, 2021(8): 67–73. [Wang Shun, Yin Juan, Zhang Haijun, et al. Effects of different water and nitrogen treatments on soil enzyme activity and yield of potato[J]. Water Saving Irrigation, 2021(8): 67–73.]

[35] 勒佳佳, 苏原, 彭庆文, 等. 氮添加对天山高寒草原土壤酶活性和酶化学计量特征的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 382–389. [Le Jiajia, Su Yuan, Peng Qingwen, et al. Effects of nitrogen addition on soil enzyme activities and ecoenzymatic stoichiometry in alpine grassland of the Tianshan mountains[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 382–389.]

[36] 吴建波, 王小丹. 藏北高寒草原土壤酶活性对氮添加的响应及其影响因素[J]. 草地学报, 2021, 29(3): 555–562. [Wu Jianbo, Wang Xiaodan. Responses of soil enzyme activities to nitrogen addition and its impact factors at the alpine steppe of Northern Tibet [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(3): 555–562.]

[37] 李浩然, 李雁鸣, 李瑞奇. 灌溉和施氮对小麦产量形成及土壤肥力影响的研究进展[J]. 麦类作物学报, 2022(2): 1–15. [Li Hao ran, Li Yanming, Li Ruiqi. Research progress on the effect of irrigation and nitrogen application on wheat yield formation and soil fertility[J]. Journal of Triticeae Crops, 2022(2): 1–15.]

[38] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 防止土壤盐渍化, 提高土壤生产力[J]. 科学, 2021, 73(6): 30–34, 2, 4. [Yang Jinsong, Yao Rongjiang, Wang Xiangping, et al. Prevent soil salinization and improve soil productivity[J]. Science, 2021, 73(6): 30–34, 2, 4.]

[39] 于菲, 赵硕, 赵影, 等. 长期施用有机肥对松嫩平原西部盐碱土肥力和玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(2): 172–180. [Yu Fei, Zhao Shuo, Zhao Ying, et al. Effects of long-term application of cattle manure on soil fertility and corn yield of saline- sodic soil in western Songnen plain[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(2): 172–180.]

[40] 罗帅, 冯浩, 李成, 等. 旱区垄膜沟灌不同灌水量对土壤水盐及春玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 259–266. [Luo Shuai, Feng Hao, Li Cheng, et al. Effects of different irrigation amounts on soil water and salt and yield of spring maize under ridge with film mulching and furrow irrigation in arid area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 259–266.]

[41] 翟彩娇, 张蛟, 崔士友, 等. 盐逆境对耐盐水稻穗部性状及产量构成因素的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(4): 1–9. [Zhai Caijiao, Zhang Jiao, Cui Shiyou, et al. Effects of salt stress on the panicle traits and yield components of rice cultivars[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(4): 1–9.]

[42] 陈晓晶, 徐忠山, 赵宝平, 等. 盐胁迫对燕麦根系呼吸代谢、抗氧化酶活性及产量的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(9): 2773–2782. [Chen Xiaojin, Xu Zhongshan, Zhao Baoping, et al. Effects of salt stress on root respiratory metabolism, antioxidant enzyme activities, and yield of oats[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(9): 2773–2782.]

[43] 汪文强, 王子芳, 高明, 等. 施氮对紫色土交换性酸及盐基饱和度的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 138–142. [Wang Wenqiang, Wang Zifang, Gao Ming, et al. Effects of nitrogen application on exchangeable acidity and base saturation in purple soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(3): 138–142.]

[44] 马凯, 王振华, 王天宇, 等. 氮盐交互对膜下滴灌棉花产量及品质的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(11): 165–171. [Ma Kai, Wang Zhenhua, Wang Tianyu, et al. Interactive effects of nitrogen and salt on yield and quality of cotton in condition of under film drip irrigation[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(11): 165–171.]

[45] 李丰, 高桐梅, 苏小雨, 等. 施氮量和种植密度对芝麻光合速率、产量和氮肥利用率的影响[J]. 作物杂志, 2022(2): 215–221. [Li Feng, Gao Tongmei, Su Xiaoyu, et al. Effects of nitrogen rate and plant density on photosynthetic rate, yield, nitrogen uptake and use efficiency of sesame[J]. Crops, 2022(2): 215–221.]

[46] 张继峯, 王振华, 张金珠, 等. 滴灌下氮盐交互对加工番茄荧光特性及产量品质的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(5): 990–1003. [Zhang Jifeng, Wang Zhenhua, Zhang Jinzhu, et al. The influences of different nitrogen and salt levels interactions on fluorescence characteristics, yield and quality of processed tomato under drip irrigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(5): 990–1003.]

[47] 魏正业, 张海星, 石薇, 等. 种植方式与施氮对西北旱区饲草作物产量、品质和水分利用的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(10): 2638–2653. [Wei Zhengye, Zhang Haixing, Shi Wei, et al. Effects of planting methods and nitrogen application on forage crop yield, quality and water use in arid area of Northwest China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(10): 2638–2653.]

[48] 董士琦, 葛佳琳, 韦还和, 等. 施氮量和密度对盐碱滩涂水稻产量和品质的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(4): 820–828. [Dong Shiqi, Ge Jialin, Wei Huanhe, et al. Effects of nitrogen application rate and density on rice yield and quality in coastal saline-alkali intertidal zone[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(4): 820–828.]

[49] 沈育伊, 滕秋梅, 张德楠, 等. 湿地土壤硫组分特征及其影响因素的研究进展[J]. 生态科学, 2021, 40(1): 182–191. [Shen Yuyi, Teng Qiumei, Zhang Denan, et al. Review on soil sulfur fractions and influence factors in wetlands[J]. Ecological Science, 2021, 40 (1): 182–191.]

[50] 谭向平, 何金红, 郭志明, 等. 土壤酶对重金属污染的响应及指示研究进展[J]. 土壤学报: 1–15, http: //kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20211126.1624.010.html, 2022–10–30. [Tan Xiang Ping, He Jin Hong, Guo Zhi Ming, et al. Research progresses on soil enzymes as indicators of soil health and their responses tu heavy metal pollution[J]. Acta Pedologica Sinica: 1–15, http: //kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20211126.1624.010.html, 2022–10–30.]

[51] 解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 等. 滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系[J]. 环境科学, 2018, 39(3): 1404−1412. [Xie Xuefeng, Pu Lijie, Wang Qiqi, et al. Response of soil enzyme activities and their relationships with physicochemical properties to different aged coastal reclamation areas, eastern China[J]. Environmental Science, 2018, 39(3): 1404−1412.]

[52] 崔爱花, 孙亮庆, 刘帅, 等. 棉花产量和土壤微生物数量及酶活性对棉田间作系统的响应[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(2): 53−58. [Cui Aihua, Sun Liangqing, Liu Shuai, et al. Effects of NPK fertilizers and organic manure on nutritional quality, yield of tomato and soil enzyme activities[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(2): 53−58.]

[53] 谢洪宝, 于贺, 陈一民, 等. 秸秆深埋对不同氮肥水平土壤蔗糖酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(24): 79−83. [Xie Hongbao, Yu He, Chen Yiming, et al. Effects of straw buried deep on invertase activity in soil with different nitrogen fertilizer levels [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(24): 79−83.]

[54] 胡洋, 丛孟菲, 陈末, 等. 氮添加对巴音布鲁克高寒湿地土壤微生物量和酶活性的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 1−12. [Hu Yang, Cong Mengfei, Chen Mo, et al. Effects of nitrogen addition on soil microbial biomass and enzymatic activity in Bayinbuluk alpine wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 1−12.]

Effects of saline water drip irrigation on soil salt accumulation and cotton growth during the whole growth period

GUO Xiaowen, LIU Jiawei, ZHENG Zhiyu, MIN Wei

(Key Laboratory of Oasis Ecological Agriculture Corps, College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China)

Abstract: There is a shortage of freshwater resources in arid areas, but saline water resources are abundant. Long-term saline water irrigation will affect soil chemical properties, cotton growth, and yield. By studying the effects of different irrigation water salinity and nitrogen application rates on soil soluble salt ions, soil elements, enzyme activity, cotton growth, and yield, their relationship was analyzed. Three kinds of irrigation water salinity were set in the experiment, which were 0.35 (freshwater), 4.61 (brackish water), and 8.04 (saline water) $dS \cdot m^{-1}$, expressed in FW, BW, and SW, respectively. The nitrogen application rates are 0 and 360 $kg \cdot hm^{-2}$ respectively, which are expressed as N0 and N360, respectively. The results showed that: (1) compared with fresh water irrigation, brackish water, and saline water irrigation significantly reduced cotton biomass and seed cotton yield. Compared with no nitrogen application, nitrogen application significantly increased cotton biomass and seed cotton yield. (2) With the increase in salinity of irrigation water, the contents of Na^{+}, Ca^{2+}, Cl^{-}, and Ca increased significantly, while the contents of SO_4^{2-}, HCO_3^{-}, Mg^{2+}, Na, Ni, Co, Cr, K, Fe, Se, and Cu decreased significantly. Under the condition of nitrogen application, the contents of Na^{+}, Ca^{2+}, Cl^{-}, and SO_4^{2-} increased significantly, while the contents of HCO_3^{-}, Mg^{2+}, K^{+}, P, K, Ca, Fe, Se, Zn, Al, and Mg decreased significantly. (3) With the increase in salinity of irrigation water, the activities of sucrase, catalase, dehydrogenase, polyphenol oxidase, hydroxylamine reductase, alkaline phosphatase, and aryl sulfatase decreased significantly, while the activities of nitrate reductase and nitrite reductase increased significantly. Nitrogen application significantly increased soil enzyme activity. Comprehensive analysis showed that saline water irrigation reduced the activities of soil sucrase, catalase, dehydrogenase, polyphenol oxidase, hydroxylamine reductase, alkaline phosphatase, and aryl sulfatase, and reduced the yield of seed cotton. The soluble salt ions Cl^{-}, SO_4^{2-}, Na^{+}, and Ca^{2+} in saline water were the main driving factors for the change in enzyme activity.

Keywords: water salinity; nitrogen application rate; soil ions; soil enzyme activity; seed cotton yield